野島断層平林NIEDコア中のカルサイト脈の炭素・酸素同位体組成

著者	新井 崇史, 塚原 弘昭, 森清 寿郎, 池田 隆司, 小村 健太朗
雑誌名	防災科学技術研究所　研究報告
巻	61
ページ	237-243
発行年	2001-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00001128

野島断層平林NIEDコア中のカルサイト脈の炭素・酸素同位体組成

新井崇史*・塚原弘昭*・森清寿郎*・池田隆司**・小村健太朗**

Carbon and Oxygen Isotope Ratios of the Calcite Vein in the Nojima Hirabayashi NIED Drilling Core

By

Takashi ARAI*, Hiroaki TSUKAHARA*, Toshiro MORIKIYO*
Ryuji IKEDA, and Kentaro OMURA****

**Faculty of Science, Shinshu University, Japan*
***National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

Abstract

The Nojima fault appeared on the surface in the northern part of Awaji Island, central Japan as a result of the Hyogo-ken Nanbu earthquake (1995. 1, M=7.2). An active fault drilling was performed by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) near the fault at Nojima Hirabayashi, and core specimens from depths of 660 to 1,810m were retrieved simultaneously. This borehole penetrated three fracture zones at the depths of 1,140m, 1,300m, and 1,800m.

We obtained 46 calcite samples from the vein from the drilling cores in fracture and non-fracture zones. Carbon and oxygen isotope ratios were analyzed to investigate the characteristic isotope ratios in the active fault zone and to estimate the origin of the fluids which precipitated the calcite. The analyzed values of the carbon and oxygen isotope ratios are −13.2 to 0.1 ‰ and 8.6 to 21.6 ‰, respectively. The carbon and oxygen isotope ratio of calcite in the fracture zone is enriched in ^{13}C and ^{18}O compared to the non-fracture zone.

If the fluids have migrated through the fracture zone and precipitated calcite at the depths where the core specimens were retrieved (29 to 58°C), the isotope ratios of fluids in equilibrium with these carbonates are calculated to be $\delta^{13}C$: −22 to −8 ‰ and $\delta^{18}O$: −18 to 4 ‰. These results indicate that the carbonates have been formed from geothermal water.

On the other hand, the carbon and oxygen isotope ratios appear to be positively correlated. This indicates that fluids of the same origin ($\delta^{13}C$: −0.5 ‰, $\delta^{18}O$: −11.6 ‰) may have precipitated the calcite at different temperatures (about 30 to 220°C). In this case, the calcite in the fracture zone has been precipitated at lower temperatures compared to in the non-fracture zone. Therefore, shallow water from near the surface may have migrated down through the fracture zone.

Key Words: Calcite vein, Isotopic geochemistry, Fluid flow, Nojima fault, Hyogo-ken Nanbu earthquake

*信州大学理学部　Asahi 3-1-1, Matsumoto, Nagano, Japan
**防災科学技術研究所

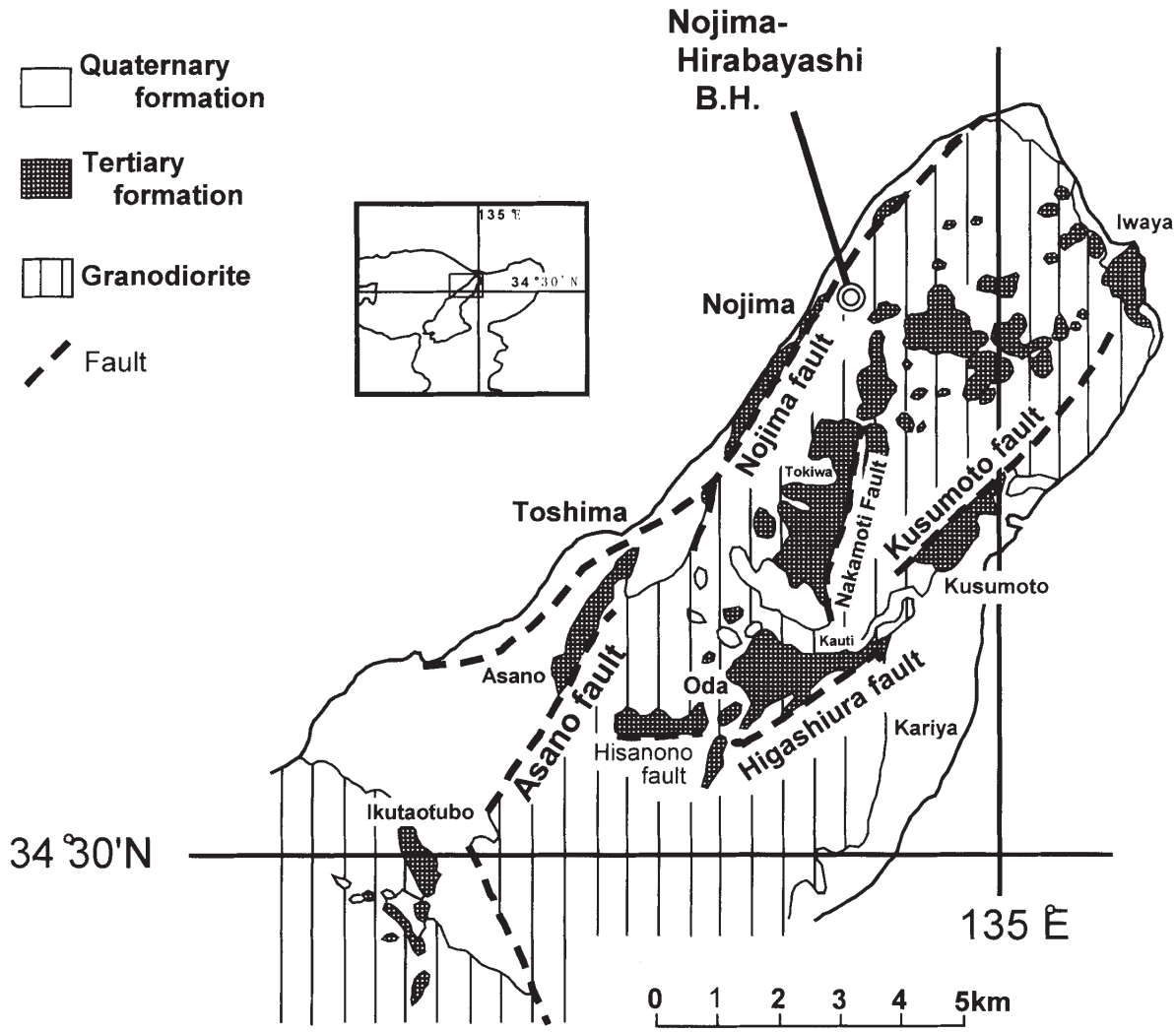

図1　淡路島北部の地質図および掘削地点

Fig. 1　Geological map and borehole site in the northern part of Awaji Island.

1．はじめに

兵庫県南部地震発生（1995，M＝7.2）に伴い，兵庫県淡路島北部地域に野島断層が地表に出現した．地震発生から約1年後，科学技術庁防災科学技術研究所（NIED）は，この野島断層地下深部破砕帯に向け，1,800 m ボーリングを実施した（図1）．この際，深度1,001～1,838 m において連続的に岩石コアが回収され，断層構成岩石の微細構造解析および化学分析等に使用された．我々は，これらの岩石コア中の微小亀裂群を充填している炭酸塩鉱物に着目した．地熱・熱水地帯および鉱山において炭酸塩鉱物脈の炭素･酸素同位体比が測定された例は多い（例えば，Ryu, 1966）．しかし，活断層破砕帯亀裂群を充填する炭酸塩鉱物脈の炭素・酸素同位体比が測定された例はない．そこで，断層帯に特徴的なカルサイト脈の炭素･酸素同位体比組成およびその形成機構を明らかにすると同時に，カルサイトを形成した流体の炭素・酸素同位体比およびその起源を推定することを試みた．

ここで，図1に掘削地点を示す．掘削は，津名郡北淡町平林地区において，断層線の南東（上盤）側約320 m の地点で実施された．岩石コア試料は，主に花崗岩類とその破砕･変質物で構成され，1,140，1,300，1,800 m の各深度付近において，顕著な変形・変質作用を被った断層破砕帯が認められる（小林ほか，1998）．

2．測定方法

炭酸塩は，釘を使用し，脈から直接削りだした．これらをめのう乳鉢を使って，粉末状にした後，粉末X線回折装置（XRD）により鑑定をおこない，カルサイトを多く含有するサンプルを使用した．$CaCO_3$の炭素・酸素同位体組成は，試料約0.5 mg を次式のように100%のリン酸と反応させることによりCO_2として抽出し，これを測定に用いた（MacCrea, 1950）．

$$2\,H_3PO_4 + 3\,CaCO_3 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3\,CO_2 + 3\,H_2O$$

リン酸との反応で抽出されるCO_2ともとの鉱物では，温度に依存して酸素同位体比が異なる．このため，カルサイトについては，25℃で反応させ，CO_2-炭酸塩間の同位体分別係数をαとして，Sharma and Clayton (1965)

の値，1.01025 を用いた．

一方，亀裂群を充填する炭酸塩鉱物にはカルサイト（$CaCO_3$），シデライト（$FeCO_3$），ドロマイト［$Ca(Mg, Fe, Mn(CO_3)_2$］が存在する．反応に要する時間は，鉱物種により異なり，25℃で，カルサイトは1時間，ドロマイトは3日間，シデライトについては，50℃で1週間要する．そこで，25℃で反応開始後，1時間までに抽出された CO_2 の炭素・酸素同位体比を測定した．同位体比の測定は信州大学理学部地質学教室の MAT 250 質量分析計を用いた．測定値は，標準物質からの千分偏差 δ 値（‰）で表示する．炭素同位体比に関しては，PDB を基準とし，酸素同位体比に関しては，SMOW を基準とした．測定誤差は，±0.3 ‰以内である．

3．測定結果

分析の結果，$\delta^{13}C$ は −13.1〜0.1 ‰，$\delta^{18}O$ は 8.9〜26.1 ‰の値を示した．カルサイトの炭素・酸素同位体比の測定結果を**表 1, 図 2** に示す．測定した値を地熱地帯，鉱山などのカルサイト脈の同位体組成と比較した．カルサイト脈の炭素同位体組成の多くは，−15〜0 ‰範囲内にある（例えば，Ryu and Ohmoto, 1974, Casadevall and Ohmoto, 1977）ことを考えると一般的な値と言えるであろう．一方，カルサイト脈の酸素同位体組成は，20 ‰以下であるのが一般的である（例えば，水谷ほか，1983, Morishita, 1990）と考えると今回測定されたカルサイト脈の同位体組成は，^{18}O に富んでいると言える．また，$\delta^{13}C$ 値と $\delta^{18}O$ 値の間には，わずかに正の相関があるようにも見えるが，明確な相関はない．そこで，掘削深度（m）に対して $\delta^{13}C$ 値と $\delta^{18}O$ 値をそれぞれプロットしたグラフを図 3 に示す．この図から 1,140, 1,300, 1,800 m の破砕帯で $\delta^{13}C$，$\delta^{18}O$ 値ともに高い値を示していることが解った．破砕が進行していない比較的岩石が新鮮な深度では，$\delta^{13}C$ 値が −14〜−10 ‰，$\delta^{18}O$ 値が 9〜14 ‰であるのに対し，破砕が進行している深度では，$\delta^{13}C$ 値が −10〜0 ‰，$\delta^{18}O$ 値が 14〜26 ‰にまで重くなる．

4．考察

測定結果から断層破砕帯中を充填するカルサイト脈の炭素・酸素同位体組成は，^{13}C，^{18}O に富んでいることが判明した．このような現象を説明するためには，次の 2 通りの炭酸塩形成過程が考えられる．

(A) 破砕帯では，非破砕部においてカルサイトを沈殿させた流体とは異なる炭素・酸素同位体組成を持つ水が，コア採取深度の地温でカルサイトを沈殿させた．

(B) 同じ同位体組成を持つ水が，異なる温度条件でカルサイトを晶出させた．

そこで，カルサイト—二酸化炭素の炭素同位体分別，およびカルサイト—水間の酸素同位体分別の温度依存性は次のように確立しているので，これらの式を用い，(A), (B)の形成過程を検討した．

Drilling depth (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{13}C$ (‰)
660.62	13.7	−10.3
842.00	8.9	−12.3
860.00	11.5	−11.9
1015.20	13.2	−10.0
1017.23	11.9	−12.4
1022.89	14.7	−8.1
1031.40	19.3	−6.2
1038.05	12.2	−8.0
1041.30	15.7	−6.7
1046.00	18.6	−8.3
1054.50	19.7	−10.1
1099.90	17.8	−3.4
1121.90	18.4	−4.6
1135.70	17.7	−1.3
1140.05	22.2	−1.6
1140.35	16.5	−1.5
1140.50	22.3	−0.4
1163.90	23.1	0.1
1183.60	20.7	−0.7
1186.70	17.1	−2.7
1190.05	18.2	−1.3
1210.70	19.7	−9.1
1213.50	17.8	−7.7
1223.50	20.8	−3.1
1282.70	12.8	−10.1
1310.70	20.6	−7.2
1331.40	22.3	−2.7
1378.95	22.1	−4.5
1405.10	21.3	−7.9
1419.20	22.3	−8.0
1511.25	11.7	−11.1
1511.55	11.8	−11.4
1564.50	11.2	−11.0
1575.50	10.5	−12.4
1587.00	13.3	−11.7
1619.90	12.7	−11.8
1627.30	9.6	−9.0
1646.10	10.1	−10.8
1662.70	11.8	−13.1
1739.75	8.9	−8.8
1769.20	11.4	−13.2
1777.70	9.0	−10.9
1781.70	13.4	−10.3
1792.55	26.1	−1.7
1816.80	26.0	−1.0

表 1　野島断層 NIED 1,800m ボーリングコア中のカルサイト脈の炭素・酸素同位体組成

Table 1　Carbon and oxygen isotope ratios of the calcite vein in NIED 1,800m drilling cores.

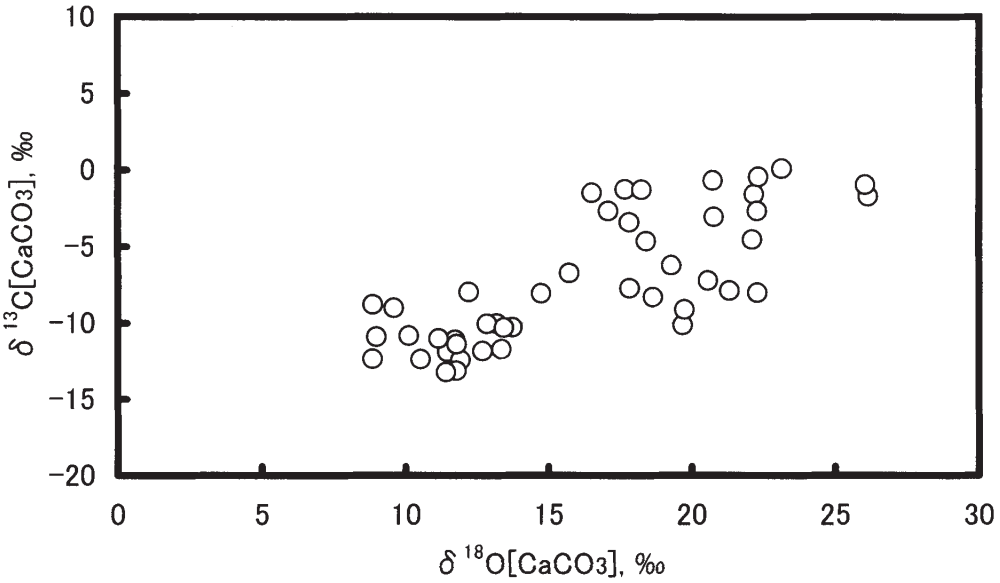

図2　カルサイトの炭素・酸素同位体比相関図

Fig. 2　The correlation between $\delta^{13}C[CaCO_3]$ and $\delta^{18}O[CaCO_3]$.

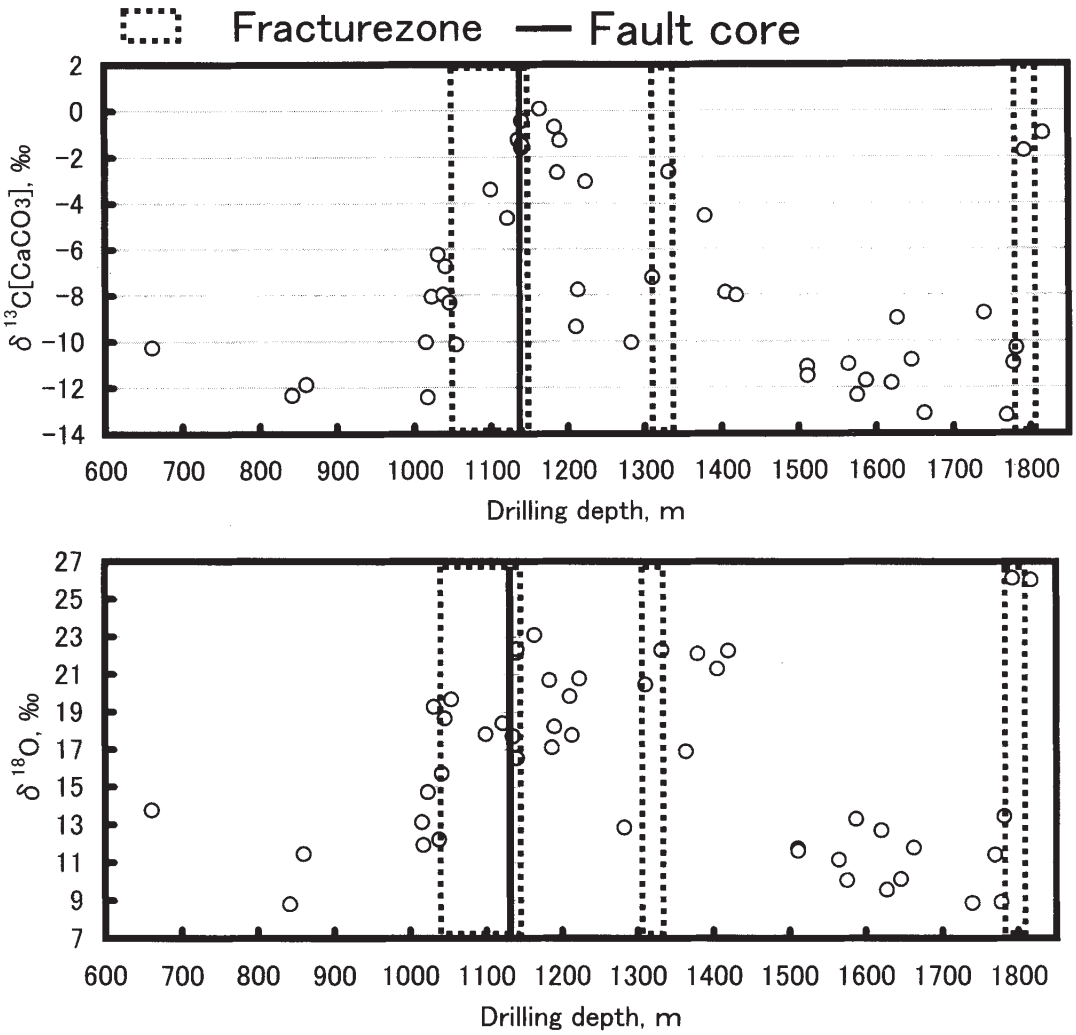

図3　カルサイトの炭素・酸素同位体比の深度分布

Fig. 3　The distribution of carbon and oxygen isotope ratios with drilling depth.

$$1000\ln\alpha c[CaCO_3-CO_2]$$
$$=\delta^{13}C[CaCO_3]-\delta^{13}C[CO_2]$$
$$=-2.9880(10^6T^{-2})+7.6663(10^3T^{-1})-2.4612 \quad (1)$$
(Bottinga, 1968)

$$1000\ln\alpha c[CaCO_3-H_2O]$$
$$=\delta^{18}O[CaCO_3]-\delta^{18}O[H_2O]$$
$$=2.78(10^6T^{-2})-2.89 \quad \cdots\cdots(2)$$
(O'Neil et al., 1969)

(A)の形成過程による $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$

カルサイトが，コア採取深度の地温（29～58°C）で形成されたと仮定し，カルサイトを沈殿させた流体の $\delta^{13}C[CO_2]$ および $\delta^{18}O[H_2O]$ を(1)，(2)式から算出した．算出された値の範囲は，$\delta^{13}C[CO_2]$ は−22～−8‰，$\delta^{18}O[H_2O]$ は−18～4‰である（図4）．高温火山ガスおよび地熱水の中には，$\delta^{13}C[CO_2]$ および $\delta^{18}O[H_2O]$ が，それぞれ−10～0‰，>0‰の高い値を示すものが存在することが知られている（Sano and Marty, 1995，松葉谷，1991）．この場合，破砕帯中のカルサイトサンプルから算出された流体のほうが，^{13}C，^{18}O に富んでいたので，破砕部では，断層を通路として上昇してきた地熱水（高温流体）が，カルサイトを沈殿させた可能性が示唆される．

(B) の形成過程による $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$

一定の C，O 同位体比を持つ水からカルサイトがそれぞれ異なる温度条件で晶出した場合を考える．ここで $\delta^{13}C[CO_2]$ が−0.5‰，$\delta^{18}O[H_2O]$ が−11.6‰の値をもつ流体を想定し，この値を(1)，(2)式に代入した後，各カルサイトの晶出温度を決定した．その結果，今回測定された全カルサイトは，30～225°Cの温度範囲で晶出したと推定できた．カルサイト炭素・酸素同位体比は，破砕が進行している個所ほど $\delta^{13}C$ 値が高く，$\delta^{18}O$ 値も高いので，破砕帯での生成温度が低かったと言える．つまり，非破砕部では，花崗岩冷却時の最高で225°Cにおよぶ高温で，破砕部では，30°C前後の地温でカルサイトが形成されたことを示している．この場合，断層運動後，断層破砕帯中の透水係数が増加し，大量の浅層地下水が下降した可能性が示唆される．

5．まとめ

野島断層亀裂群を充填するカルサイト脈の炭素・酸素同位体比を測定した．その結果，$CaCO_3$ の $\delta^{13}C$ は，−13.2～0.1‰，$\delta^{18}O$ は 8.6～26.1‰の値を示し，脈としては一般的に見られる値よりも ^{13}C，^{18}O に富んでいるデータが多いことが判明した．これらの重い炭素・酸素同位体組成をもつカルサイトは，1,140，1,300，1,800 m の大規模な破砕帯で採取されたものであった．つまり，破砕・変質が進行している深度のサンプル中の ^{13}C 値，$\delta^{18}O$ 値が重いことがわかった．そこで，このカルサイトを沈殿させた流体の炭素・酸素同位体組成を推定することにより，カルサイトの形成過程を考察した．

(A) カルサイトが，コア採取深度の地温（29～58°C）で形成されたと仮定した場合

カルサイトを沈殿させた溶存炭酸の炭素同位体比および水の酸素同位体比は，それぞれ−22～−8‰，−18～4‰と算出される．さらに，破砕が進んでいる個所ほど算出された流体の $\delta^{13}C$ 値，$\delta^{18}O$ 値ともに高い値を示して

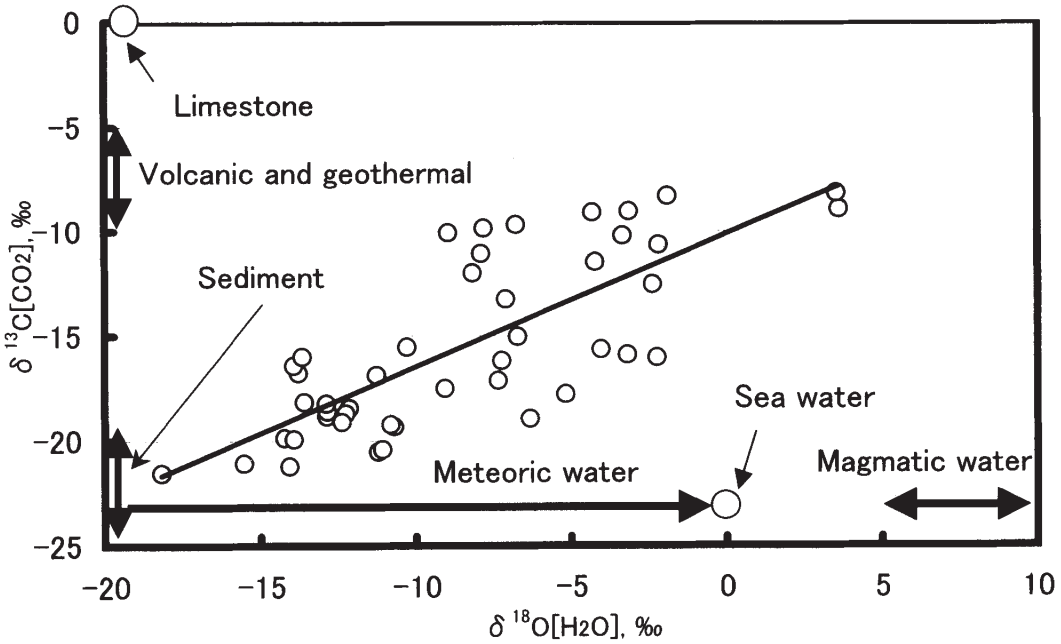

図4　コアが回収された地点の温度におけるカルサイトの炭素・酸素同位体比から算出された流体の炭素・酸素の同位体比

Fig. 4　Calculated carbon and oxygen isotope ratios of fluids at the temperatures where the cores were retrieved (29-58°C).

いた．よって，破砕部では，断層帯を通路として移動してきた地熱水からカルサイトが沈殿した可能性が示唆される．

(B)　一定のC，O同位体比を持つ溶存炭酸および水からカルサイトが沈殿したと仮定した場合

破砕帯でのカルサイトの生成温度は非破砕部に比べ，低く算出される．その場合，断層運動後，断層破砕帯中の透水係数が増加し，大量の浅層地下水が下降した可能性がある．

今後の課題としては，カルサイト脈中に形成された流体包有物の均質化温度を測定することによってカルサイト形成温度を明らかにし，より限定されたカルサイト形成機構および流体移動モデルを決定する必要がある．

謝辞

コア解析グループの諸氏にはコアを使用させていただく貴重な機会を与えていただいた．また，分析の際には富山大学の佐竹教授にご協力いただいた．

参考文献

1) Bottinga, Y. (1968): Calculation of fractionation factors for carbon and oxygen isotopic exchange in the system calcite-carbon dioxide-water. J. Phys. Chem., No. **72**, 800-808.
2) Casadevall, T. and Ohmoto, H. (1977): Sunnyside mine, Eureka mining district, San Juan County, Colorado: geochemistry of gold and base metal ore formation in the volcanic environment. Econo. Geol., No. **72**, 1285-1320.
3) 小林健太・松田達生・新井崇史・池田隆司・小村健太郎・佐野広征・澤口　隆・田中秀美・富田倫明・富田直人・平野　聡・山崎暁子(1998)：野島断層深部における断層岩・鉱物・元素の分布様式．月刊地球号外，No. **21**, 154-159.
松葉谷治(1991)：熱水の地球化学，48-77, 裳華房.
4) McCrea, J. M. (1950): On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. Jour. Chem. Phys., No. **18**, 849-857.
5) 水谷義彦・秋山伸一・木村美紀夫・日下部実・佐竹　洋・臼井和人・前田伊通子(1983)：岐阜県中尾地域の地熱調査井54-NK-1における岩石変質と変質鉱物の同位体地球化学．日本地熱学会誌，**5**-2, 121-138.
6) Morishita, Y. (1990): Fluid evolution and geobarometry on the Ohtani and Kaneuchi tungsten-quartz vein deposits, Japan: oxygen and carbon isotopic evidence. Mineral Deposita, No. **26**, 40-50.
7) O'Neil R James *et al.* (1969): Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates. The Journal of Chemical Physics, No. **51**, 5547-5558.
8) Ryu O. R. (1966): The carbon, hydrogen, and oxygen isotopic composition of the hydrothermal fluids responsible for the lead-zinc deposits at Providencia, Zacatecas, Mexico. Econo. Geol., No. **61**, 1399-1427.
9) Ryu, O. R. and Ohmoto, H. (1974): Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review. Econo. Geol., No. **69**, 826-842.
10) Sano Y and Marty (1995): Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. Chemical geology (Isotope Geoscience Section). No. **119**, 265-274.
11) Sharma, T. and Clayton, R. N. (1965): Measurement of O18/O16 ratios of total oxygen of carbonates. Geochimi. Cosmochim. Acta, No. **29**, 1347-1353.

(原稿受理：2000年12月14日)

要　旨

兵庫県南部地震発生（1995.1，M＝7.2）に伴い，淡路島北部地域の地表に野島断層が出現した．地震発生から約1年後，防災科学技術研究所により1,800 m ボーリングが実施された．同時に回収された1,001～1,838 m 間のボーリングコア観察から，深度1,140，1,300，1,800 m 付近で破砕帯が認められた．そこで，我々は，これらの岩石コア中の微小亀裂群を充填しているカルサイトの炭素・酸素同位体比を測定した．その結果，炭素・酸素同位体比はそれぞれ−13.2～0.1‰，8.6～26.1‰の値を示した．さらに，1,140，1,300，1,800 m の破砕帯で $\delta^{13}C$ 値，$\delta^{18}O$ 値ともに高い値を示していることが解った．そこで，カルサイトを沈殿させた流体の炭素・酸素同位体組成を推定することにより，カルサイトの形成機構を考察した．

(A) カルサイトが，コア採取深度の地温（29～58°C）で形成された場合，カルサイトを沈殿させた CO_2 ガスの炭素同位体比および H_2O の酸素同位体比は，それぞれ−22～−8‰，−18～4‰と算出される．破砕が進んでいる個所ほど $\delta^{13}C$ 値，$\delta^{18}O$ 値ともに高い値を示すので，破砕部では，断層帯を通路として上昇してきた地熱水からカルサイトが沈殿した可能性が示唆される．

(B) カルサイトが一定の C，O 同位体比を持つ水から，温度降下に伴い晶出した場合，破砕帯でのカルサイトの生成温度は非破砕部に比べ，低く算出される．その場合，断層運動後，断層破砕帯中の透水係数が増加し，大量の浅層地下水が下降した可能性がある．

キーワード：カルサイト脈，同位体地球化学，断層流体，野島断層，兵庫県南部地震